文章编号： 1007-4627(2024) 03-0123-08

HIRFL-CSR 外靶实验终端 Veto 探测器的刻度

刘拓琦[1,2]，唐述文[1,2]，孙 宇[3,4]，余玉洪[1,2]，方 芳[1,2]，王世陶[1,2]，章学恒[1,2]，孙志宇[1,2]，卢奋华[1,2]，傅圣威[1,2]，李治垚[1,2]，魏啸宝[5]，徐颖锋[1,2]

(1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心，南昌 330013；
4. 东华理工大学核科学与工程学院，南昌 330013；
5. 河南师范大学，新乡 453007)

摘要：使用宇宙射线对兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 外靶实验终端 (ETF) 的 Veto 探测器开展了刻度工作，工作主要分为位置刻度与时间刻度两部分。位置刻度可给出粒子在探测器上的击中位置，时间刻度则能为粒子在探测器上击中时刻的探测建立统一标准。这些信息是剔除入射到中子墙探测器的带电粒子事件的依据，可为中子墙探测器物理目标的实现提供重要支持。在刻度过程中，得到了 Veto 探测器的位置分辨半高全宽 (FWHM) 为 2.53 cm，所有单元条时间归一后的时间分辨 FWHM 为 1.09 ns。

关键词：Veto 探测器；刻度；宇宙射线；位置分辨；时间分辨

中图分类号：O571.53　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11804/NuclPhysRev.32.01.123

1 引言

远离 β 稳定线的丰中子核结构与性质的研究是当前核物理前沿领域之一[1]，近年来，随着中子晕及中子皮等独特结构的发现[2]，滴线核及非束缚丰中子核的研究也取得重要进展[3]，人们对中子滴线附近核的结构性质产生了极大的兴趣。利用放射性束流装置产生中高能区的丰中子原子核并轰击反应靶，其碎裂产物主要集中在前角区，因此仅需较小立体角的覆盖便可实现反应产物的完全测量，这就是完全运动学测量方法[4]。它利用重带电粒子碎片、中子及伽马的符合探测信息重构原子核碎裂前的状态，是研究原子核结构的有效工具。国际上利用完全运动学测量方法的典型实验装置主要有美国 MSU 的 MONA[5]、德国 GSI 的 ALADIN-LAND[6]、日本 RIKEN 的 SUMURAI[7] 以及中国近代物理研究所的外靶实验终端 (ETF)[8]。

中国兰州重离子加速器冷却储存环 CSRm 可将初级束流累积并加速到几百 MeV/u 至 1GeV/u 轰击初级靶，通过弹核碎裂反应产生放射性束流[9]，束流经 RIBLL2 分离纯化后传输到 ETF 轰击次级靶。ETF 的探测系统对反应碎裂产物进行完全运动学测量，探测系统主要包括探测带电粒子飞行时间的飞行时间墙[10]、探测带电粒子径迹的多丝漂移室[11]、用于偏转带电粒子的大接受度二极磁铁、用于带电粒子反符合的 Veto 探测器以及探测中子的中子墙[8]。其中 Veto 探测器放置在中子墙之前，如图 1(a)，其功能是去除入射到中子墙探测器上的带电粒子事件干扰，保证中子事件信息的准确获取。由于放射性束流强度较低，生成目标碎裂产物的截面较小，所以目标中子事件率很低，非常宝贵。由于二极磁铁的磁场强度只能设置在一定的范围，且出射带电碎片的角分布可以很广，故中子墙上难以避免地会混入带电粒子事件，这将对中子事件的探测形成干扰。中高能中子的探测通过其与探测介质中的原子核相互作用产生的次级带电粒子实现，仅凭中子墙无法区分中子与带电粒子，带电粒子被误判为中子将严重影响实验结果。Veto 探测器选用薄型低原子序数材料作为探测介质，目标能区中子在 Veto 探测器上的能损很小，基本不产生有效信号，而 Veto 探测器对带电粒子却具有很高的探测效率，因此可利用 Veto 探测器信号的有无来实现带电粒子本底的去除。Veto 探测器对带电粒子的探测效率是反映其性能的重要指标，越高的探测效率代表带电粒子被误判为中子的几率越小，探测效率刻度的相关工作在文献[12] 中已有详细介绍。

除了探测效率刻度以外，位置刻度与时间刻度同样

收稿日期：2024-02-05；　**修改日期：**2024-02-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.U2031206, No.12273086, No.U1832122）；江西省核技术应用教育部工程研究中心资助项目（HJSJYB2022-3）
作者简介：刘拓琦 (1999–)，男，湖南衡阳人，硕士研究生，从事放射性束物理研究；E-mail: liutuoqi@impcas.ac.cn
通信作者：E-mail: tangsw@impcas.ac.cn

是 Veto 探测器实现其功能的重要保障。比如在实验中，核反应产生的带电粒子与中子有一定几率同时穿过 Veto 探测器轰击到中子墙探测器上，产生的信号将被作为同一事件收集。此时，仅依靠 Veto 探测器是否有信号作为去除带电粒子的判据可能会造成误判，导致部分中子事件被错误剔除。通过位置刻度可获得带电粒子在 Veto 探测器上的击中位置，再结合中子墙探测器上的位置信息可准确去除带电粒子相关的着火点，同时保留下完整的中子事件信息，提高对中子的探测效率。此外，中高能中子与中子墙探测介质原子核相互作用产生的次级带电粒子有可能发生背散射，背散射带电粒子表现为从中子墙上产生、穿过几层中子墙单元条后、再穿过 Veto 探测器后射出。它使 Veto 探测器点火，从而造成中子事件的错误剔除。而对 Veto 探测器进行时间刻度可获得粒子击中 Veto 探测器的时刻，通过比较粒子在 Veto 探测器与中子墙探测器上点火时刻的先后可判断入射粒子是正常入射的带电粒子还是中子引起的背散射事件，从而为正确保留中子事件提供依据。由以上原因可知，对 Veto 探测器开展位置与时间刻度工作是后续开展数据分析的重要保障。

2 实验设备

2.1 Veto 探测器

ETF 的 Veto 探测器放置于中子墙探测器前约 10 cm 处，如图 1(a) 所示。

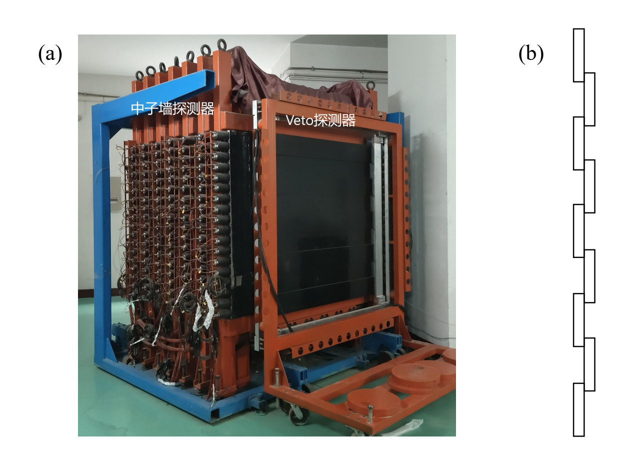


图 1 (在线彩图) (a) 为 ETF 中子墙探测器与 Veto 探测器实物图，(b) 为 Veto 探测器侧视结构示意图

Veto 探测器主体由 9 根条状探测单元组成，单元条的探测介质为 Eljen Technology 公司生产的 EJ-200[13] 塑料闪烁体。每根单元条的尺寸为 1500 mm×180 mm×10 mm，在单元条的内层包裹漫反射材料 Tyvek 纸以改善荧光收集性能，在外层再套上一层黑色热缩管用于避光，防止自然光干扰。与中子墙探测器一样，Veto 探测器单元条的信号也采用双端读出的方式。考虑到采用光电倍增管 (PMT) 作信号读出器件需要在单元条与 PMT 之间加入形状过渡的光导，且 PMT 和光导的价格较贵。因此，若采用 PMT 作为读出器件一方面将使探测器的总成本增加，另一方面总体尺寸也会过大。近年来迅速发展的硅光电倍增管（SiPM）具有增益高、时间性能好、结构紧凑且价格便宜等优势，出于设计考虑，单元条两端选用 SiPM 作为读出器件，所选型号为日本滨松公司生产的 S13360-6050CS[14]。由于该型号 SiPM 灵敏面积为 6 mm×6 mm，在每根单元条的两端各使用 9 个 SiPM，以增大荧光接收面积，提高荧光收集效率。9 个 SiPM 采用并联方式连接，9 个信号最终合并成一个信号引出。整个 Veto 探测器的 9 根单元条横向交错排列、分布在两层，且相邻 3 根单元条呈“品”字型结构，相邻 2 根单元条之间有 10 mm 的交叠区域，见图 1(b)。采用该结构的主要原因是入射带电粒子穿过单元条的边缘区域时探测效率会降低，即有所谓的“边缘效应”[15]，而采用这种相邻单元条有重叠的“品”字结构可以提高单元条边缘处的探测效率。

2.2 数据获取系统与数据采集卡

ETF 探测器的数据获取系统与数据采集板由中国科学技术大学研发。系统基于工业智能仪器总线 PXI 进行设计，机箱采用 6U 标准。

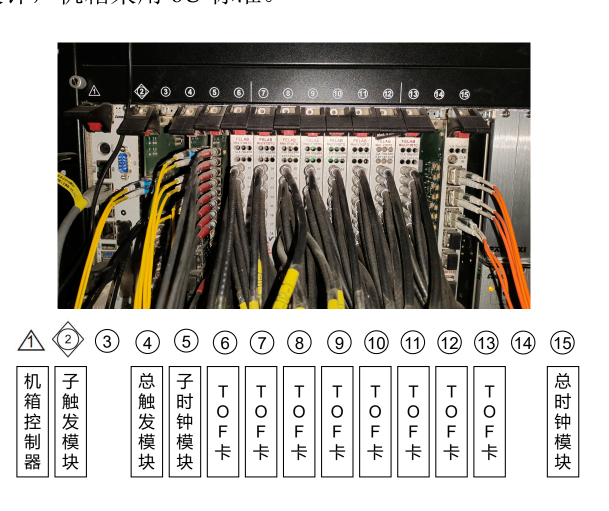


图 2 (在线彩图) PXI 机箱及其插件

在探测器信号路数较多的情况下数据获取需采用多个机箱，即一个主机箱加上多个子机箱。主机箱中包含 1 块总触发板与 1 块总时钟板，子机箱中则包含 1 块子触发板、1 块子时钟板以及若干数据采集板。总触发板用于汇总子触发板输出的子触发信号，产生总触发信号。总时钟板为所有子时钟板提供统一的时钟信号，子时钟

板将来自总时钟板的时间信号扇出至子触发板与数据采集板，为相关信号的测量提供统一的时钟。子触发板负责将子机箱内部的触发信号上传至总触发板、并将总触发信号下传至本机箱内的各数据采集板。数据采集板对有效信号进行采集。

Veto 探测器与中子墙探测器的数据获取共有三个机箱，其中一个机箱既作主机箱又作子机箱，它同时包括了 1 块总触发板、1 块子触发板、1 块总时钟板、1 块子时钟板以及多块数据采集板，见图 2。Veto 探测器使用的数据采集板为 TOF 时间电荷测量板[16](后称 TOF 板)，每块 TOF 板有 16 个通道。来自探测器的信号进入每个通道后先分为两路，一路经过前沿定时后输入到高性能时间数字转换芯片 HPTDC[17] 进行时间测量，另一路则送入 ASIC 芯片 SFE16 中进行放大、成形、甄别处理后，再送入另一块 HPTDC 中基于 TOT (Time Over Threshold) 方法[18-19] 进行电荷信息提取，得到能量信号。此外，TOF 板还能用来产生触发信号，将 16 个通道按照两两相邻为一组共分为八组，先对每一组组内的两通道进行逻辑与、再对各组信号进行逻辑或，最后产生触发信号，输出信号为 LVTTL 电平。

2.3　探测原理

带电粒子穿过 Veto 探测器单元条时会与探测介质发生相互作用，并使介质原子处于激发态。探测介质退激时产生的闪烁光子在单元条内向条的两端传递，如图 3 所示。闪烁光进入到单元条两端的 SiPM 中转换为电信号，再经信号线输入到 TOF 板进行时间与幅度采集。

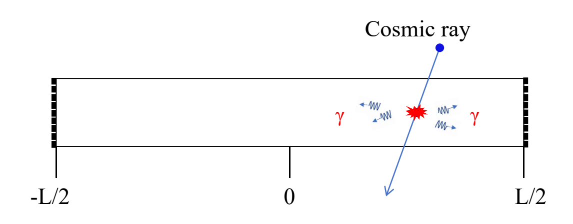


图 3　(在线彩图) 宇宙射线击中单元条示意图

TOF 板采集得到的时间具体可由下列公式表示：

$$T_{\rm L} = T_0 + \frac{L/2 + x}{v_{\rm eff}} + \tau_{\rm L0} \tag{1}$$

$$T_{\rm R} = T_0 + \frac{L/2 - x}{v_{\rm eff}} + \tau_{\rm R0} \tag{2}$$

其中，$T_{\rm L}$ 与 $T_{\rm R}$ 分别为单元条左、右两端输出信号在 TOF 板测得的时刻；T_0 代表粒子在单元条上的击中时刻，$\tau_{\rm L0}$ 与 $\tau_{\rm R0}$ 分别为单元条左、右两端对应读出通道的电子学延迟；$\frac{L/2+x}{v_{\rm eff}}$、$\frac{L/2-x}{v_{\rm eff}}$ 分别是闪烁光在单元条中传递至左、右两端所花的时间，其中 L 为单元条的长度，x 为宇宙射线在单元条上的击中位置，$v_{\rm eff}$ 为闪烁光在单元条中沿着条长方向的有效传输速率。由 (1)、(2) 式可得 x 与 T_0 的表达式：

$$x = \frac{T_{\rm L} - T_{\rm R} - \tau}{2} v_{\rm eff} \tag{3}$$

$$T_0 = \frac{T_{\rm L} + T_{\rm R} - L/v_{\rm eff} - \tau'}{2} \tag{4}$$

其中，$\tau = \tau_{\rm L0} - \tau_{\rm R0}$，$\tau' = \tau_{\rm L0} + \tau_{\rm R0}$。

3　探测器刻度

为了剔除入射到中子墙探测器的带电粒子事件的干扰，保证中子物理信息的准确获取与相关物理目标的实现，需要对 Veto 探测器开展刻度工作。Veto 探测器的刻度基于式 (3)、(4) 来进行，其中 τ 与 $v_{\rm eff}$ 的值与单元条自身及对应的电子学通道相关。主要表现在以下三个方面：首先，由于 Veto 探测器各单元条在加工和包装过程中不可能做到完全相同，这会使得光子在各单元条中的反射情况有差异，从而导致有效传输速率不同，进而造成了光子在不同单元条中经过相同长度所需的时间也不同；另外，单元条两端 SiPM 增益的不同使所得电信号的幅度不同，这将为 TOF 板的前沿定时带来差异，产生定时上的晃动；最后，TOF 板上不同的电子学通道带来的电子学延迟也不同。然而，对于每根确定的单元条，对应的闪烁体单元条、SiPM 器件以及电子学通道都是确定的，因此，τ 与 $v_{\rm eff}$ 的值也是固定的。可以利用宇宙射线开展刻度实验，得到 Veto 探测器各单元条的 τ 与 $v_{\rm eff}$ 等参数值。刻度得到的相关参数均可用于将来的束流实验中。

利用宇宙射线进行 Veto 探测器刻度时，将单元条两端的信号接入 TOF 板的相邻通道，因此，前 8 根单元条信号可接入一块 TOF 板中，第 9 根单元条的信号接入另一块 TOF 板中。两块 TOF 板的触发输出均送入机箱内的子触发板中，在其中进行逻辑或运算，最终的输出作为系统的总触发信号。因此，任意一根单元条被宇宙射线击中，都可以产生触发信号。

3.1　探测器位置刻度

正式实验时，为防止有效中子事件的错误剔除，需要确定带电粒子在 Veto 探测器上的点火位置。因此，首先需要对探测器进行位置刻度，这也是后续进行时间刻度的基础。

令 $\Delta T = T_L - T_R$，由 (3) 式可知：

$$\Delta T = \frac{2x}{v_{\rm eff}} + \tau \quad (5)$$

由式 (5) 知 ΔT 值与宇宙射线的击中位置线性相关。根据实验测得的 T_L 及 T_R 值，绘制宇宙射线击中单元条时对应 ΔT 值的直方图，如图 4(a) 所示。

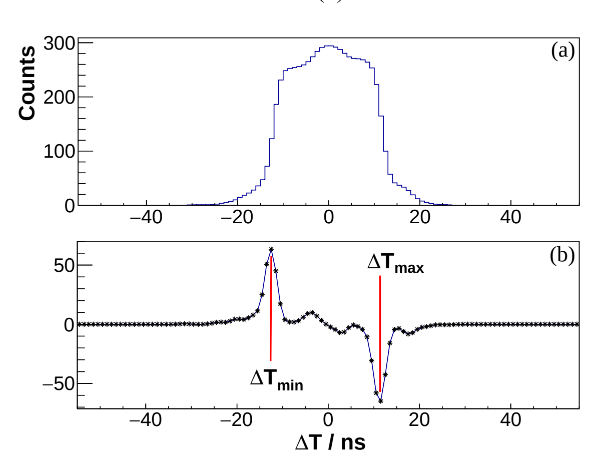


图 4 (在线彩图) (a) 为 ΔT 分布直方图，(b) 为 (a) 的计数变化率谱

由于宇宙射线打在单元条上各处的位置是随机的，ΔT 的分布理论上应该是一个均匀分布，即分布形状接近为一个矩形，且矩形的最低沿及最高沿分别对应单元条两端处的位置。但由于受光衰减长度及时间分辨的影响，在矩形的两侧方向会各形成一个拖尾。为了确定单元条的两端在 ΔT 谱中的对应位置，对图 4(a) 进行差分得到计数变化率谱，见图 4(b)。容易看出在图 4(b) 中存在两个计数率变化最快的位置，它们分别对应单元条的左右两端，即 $x = \pm L/2$ 处，相应的 ΔT 值用 $\Delta T_{\rm min}$ 与 $\Delta T_{\rm max}$ 标记。由式 (5) 易知：

$$\Delta T_{\rm min} = \tau - \frac{L}{v_{\rm eff}} \quad (6)$$

$$\Delta T_{\rm max} = \tau + \frac{L}{v_{\rm eff}} \quad (7)$$

从而可得 τ 与 $v_{\rm eff}$：

$$\tau = \frac{\Delta T_{\rm min} + \Delta T_{\rm max}}{2} \quad (8)$$

$$v_{\rm eff} = \tau + \frac{2L}{\Delta T_{\rm max} - \Delta T_{\rm min}} \quad (9)$$

最后，宇宙射线在单元条的击中位置 x 可利用 τ 与 $v_{\rm eff}$ 代入式 (3) 计算得到。表 1 列出了 Veto 探测器各单元条的 τ 值以及光子在单元条中的有效传输速率 $v_{\rm eff}$，$v_{\rm eff}$ 的平均值为 12.14 ± 0.07 cm/ns。

以 Veto 探测器的第 4 根单元条中心点为原点，平行于单元条方向向左为 x 轴正方向，垂直于地面竖直向上为 y 轴正方向，垂直于 Veto 探测器往中子墙探测器方向为 z 轴正方向建立坐标系。利用各单元条的 τ 与 $v_{\rm eff}$ 值得到入射粒子在单元条上击中位置的 x 坐标，将击中单元条在 y 方向上的中心值作为击中位置的 y 坐标，击中位置的 z 坐标为单元条所在层的安装位置。因此，一个粒子在 Veto 探测器不同单元条上的击中位置可表示为 $(x_i，y_i，z_i)$，其中 i 为单元条的编号，$(i = 0，1，2，3\ldots8)$。

表 1 Veto 探测器各单元条的 τ 与 $v_{\rm eff}$

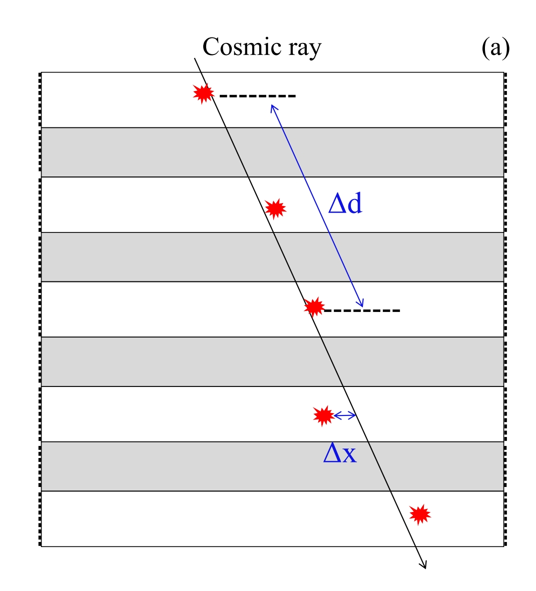
单元条序号	τ / ns	$v_{\rm eff}$ / $cm \cdot ns^{-1}$
0	-0.21	12.14
1	-0.17	12.15
2	-0.13	12.12
3	-0.14	12.14
4	-0.10	12.09
5	-0.16	12.15
6	-0.14	12.05
7	-0.17	12.11
8	0.01	12.32

由于 Veto 探测器有两层，位置刻度采用逐层进行的方法，即首先选择只穿过其中一层单元条的宇宙射线事件来刻度该层单元条，再进行另一层单元条的刻度。因此，入射的宇宙射线粒子可近似看作在 $x-y$ 平面内运动，粒子的运动径迹可用线性方程表示为：

$$y = kx + b \quad (10)$$

为了确保径迹的真实性，选择击中单元条数目不小于 3 的宇宙射线事件，利用最小二乘法对击中位置 $(x_i，y_i)$ 进行线性拟合，拟合得到的直线可认为是宇宙射线的真实径迹，并确定每条径迹的相关 k、b 系数。将击中单元条的 y 坐标代入 (10) 式，可得到粒子拟合径迹上的 x 值，即击中位置 x 的理论值。击中位置的实测值由 (3) 式计算得到，则测量误差 Δx 可由测量值与理论值作差得到。

图 5(a) 展示了一条宇宙射线穿过 Veto 探测器的情况，图中白色部分代表 Veto 探测器的第一层单元条，灰色部分代表 Veto 探测器的第二层单元条。该宇宙射线穿过 Veto 探测器第一层的 5 根单元条，红色点代表利用相应条两端测得的 T_L 及 T_R 值算出的实测击中位置，直线代表利用最小二乘法对 5 个实测位置进行拟合得到的宇宙射线径迹，图中标出了其中一根条的位置测量误差 Δx。将符合要求 (单层点火且击中单元条数目不小于 3) 的所有事件在击中单元条的 Δx 值填入直方图中，见图 5(b)，通过高斯拟合最终得到 Veto 探测器在 x 方向上的半高全宽 (FWHM) 位置分辨为 2.53 cm。



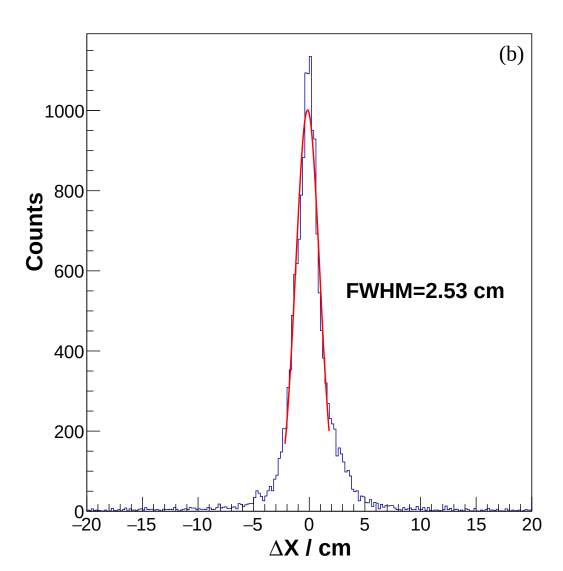


图 5　(在线彩图) (a) 为宇宙射线径迹拟合图，(b) 为 Veto 探测器 x 方向位置分辨图

3.2　探测器时间刻度

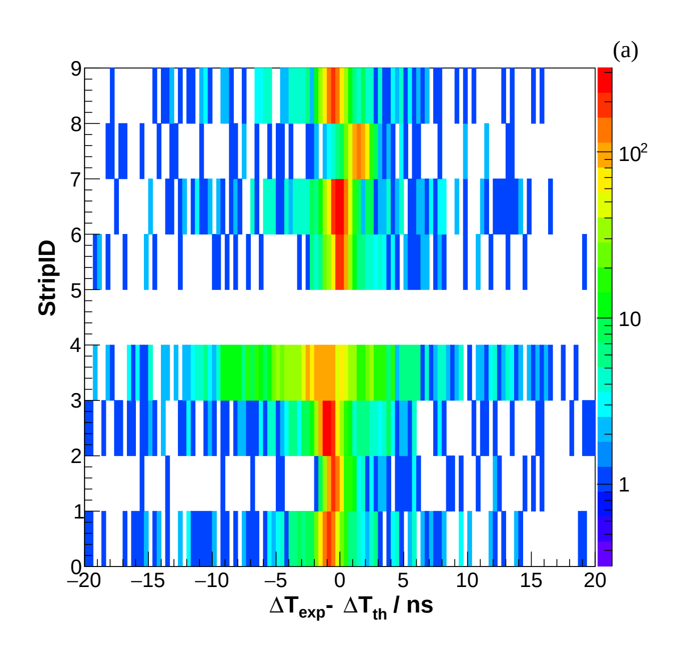
利用宇宙射线在单元条上的击中位置与拟合径迹可计算着火点之间的飞行时间，依此进行 Veto 探测器的时间刻度。如图 5(a) 所示，根据拟合径迹计算得到宇宙射线在两根单元条中 x 方向的击中位置 x_1、x_2 以及单元条的 y 坐标 y_1、y_2，可以计算两着火点之间的距离为 Δd，则相应的飞行时间理论上可表示为:

$$\Delta T_{\rm th} = \frac{\Delta d}{v} \tag{11}$$

其中 v 为宇宙射线的速度。考虑到宇宙射线的能量很高，v 近似等于光速 c。另一方面，飞行时间还可以根据式 (4) 由两根单元条实测的的 $T_{\rm L}$ 及 $T_{\rm R}$ 值表示为:

$$\Delta T_{\rm exp} = \frac{(T_{\rm L}+T_{\rm R})_{\rm ref}}{2} - \frac{(T_{\rm L}+T_{\rm R})_{\rm i}}{2} + C_{\rm ref} - C_{\rm i} \tag{12}$$

其中 $C = -(L/v_{\rm eff} + \tau^{'})/2$，为与延迟时间相关的常数，下标 ref 与 i 分别表示两根不同的单元条。$\Delta T_{\rm exp}$ 表示单元条 i 相对单元条 ref 的飞行时间，而 $\delta_{\rm i} = C_{\rm ref} - C_{\rm i}$ 表示单元条 i 与单元条 ref 的相对飞行时间差，该时间差是由于两根单元条自身结构及电子学差异引起的。由于相对时间差 $\delta_{\rm i}$ 的存在，宇宙射线在两根单元条之间的实际飞行时间 $\Delta T_{\rm exp}$ 和理论飞行时间 $\Delta T_{\rm th}$ 并不相等，这将影响整个 Veto 探测器的使用。为了消除相对时间差 $\delta_{\rm i}$ 的影响，需要对 Veto 探测器进行时间刻度。



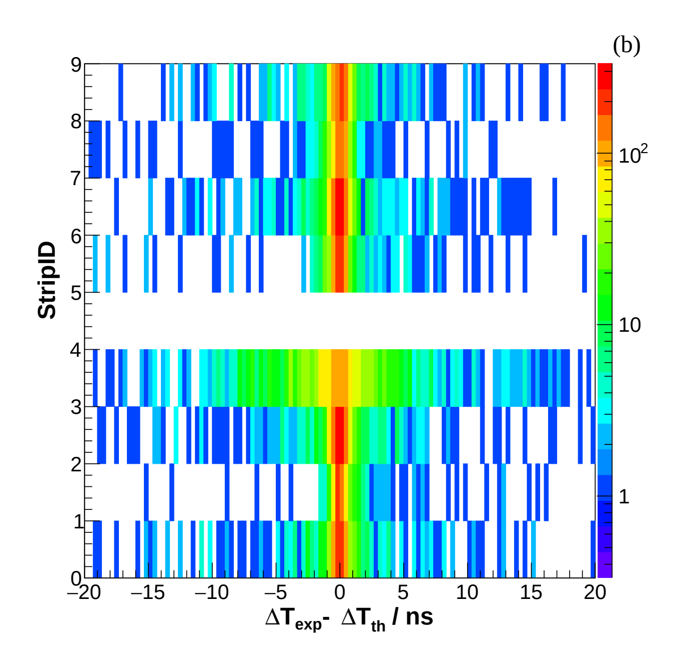


图 6　(在线彩图) Veto 探测器 $\Delta T_{\rm exp} - \Delta T_{\rm th}$ 在修正前 (a) 与修正后 (b) 的分布图

进行时间刻度时，通过固定单元条 ref 为参考条，变化单元条 i，可以得到其他单元条相较于参考条的相对时间偏差 Δt_i，并使得 $\Delta T_{exp} - \Delta T_{th} = 0$。径迹拟合时参与拟合的点数越多，拟合结果越好，$\Delta T_{exp} - \Delta T_{th}$ 更能接近真实值。Veto 探测器的时间刻度首先逐层进行，即挑选只穿过一层探测器且点火条数大于或等于三的粒子事件进行刻度，该步骤第一层的参考单元条选择 Veto 探测器的第 4 根单元条、第二层的参考单元条选择 Veto 探测器的第 3 根单元条。两层内部的刻度完成之后，再挑选同时穿过第 3、4 根单元条的事件，得到第 3 根单元条与第 4 根单元条之间的相对时间延迟偏差参数。最后，将第二层所有单元条的刻度参数转换为相对第 4 根单元条为参考条的刻度结果。图 6 展示了刻度前后 Veto 探测器不同单元条相对第 4 根单元条的 $\Delta T_{exp} - \Delta T_{th}$ 值，其中横坐标为 $\Delta T_{exp} - \Delta T_{th}$ 值，纵坐标为单元条的编号。可以看出：刻度前，由于不同单元条相较于参考条存在着不同的时间延迟偏差，因此 ΔT_{exp} 与 ΔT_{th} 值并不相等, 如图 6(a)。刻度后，可将 ΔT_{exp} 修正到与 ΔT_{th} 相等，如图 6(b)。将图 6(b) 向 x 轴方向投影，得到 $\Delta T_{exp} - \Delta T_{th}$ 值的一维直方图，对其进行高斯拟合，可以得到 Veto 探测器的时间分辨 FWHM 为 1.09 ns，如图 7 所示。此处得到的时间分辨是将 ΔT_{exp} 与 ΔT_{th} 修正到相等，即时间归一之后 Veto 探测器所有单元条总的时间分辨。

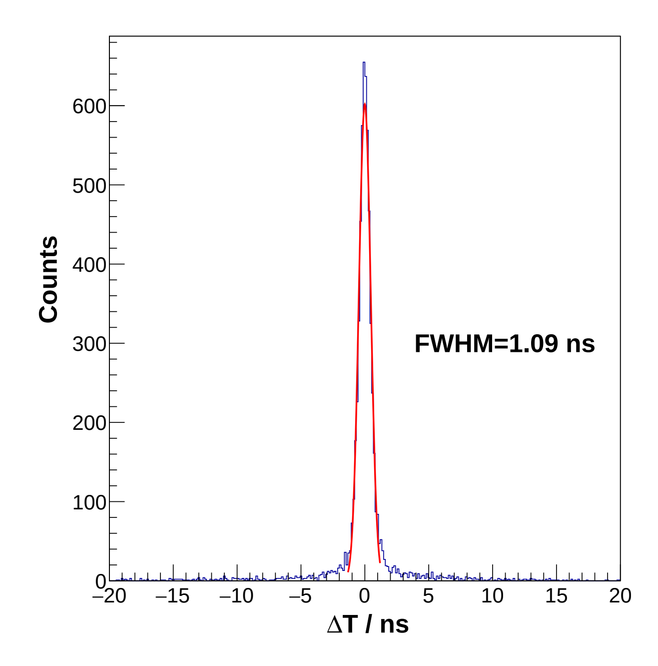


图 7　(在线彩图) Veto 探测器时间分辨

4　总结

本文介绍了利用宇宙射线对 HIRFL-CSR 外靶实验终端 Veto 探测器进行刻度的工作。位置刻度中，利用 EJ-200 塑料闪烁体单元条双端读出的时间信号，以及宇宙射线在单元条上不同位置计数的变化率，得到了粒子在单元条上的击中位置，完成了探测器的位置刻度。Veto 探测器最终沿单元条方向的位置分辨 FWHM 为 2.53 cm。时间刻度中，采取先逐层刻度后整体刻度的方案。通过选取参考条，挑选同时穿过参考条与待刻度条的事件，利用位置刻度的结果获得宇宙射线在两条之间的飞行时间理论值。该理论值与探测系统给出的实验值做差可得到实验与理论的偏差，最终完成 Veto 探测器的时间刻度。所得时间分辨为 Veto 探测器所有单元条时间归一后的 FWHM 值，结果为 1.09 ns。HIRFL-CSR 外靶实验终端 Veto 探测器的刻度可保证中子事件物理信息的正确获取，对中子墙探测中子以研究远离 β 稳定线的原子核结构与性质有着重要意义。

参考文献

[1] SHEN Wenqing, ZHAN Wenlong, YE Yanlin, et al. Nuclear Physics Review, 2001, 18(4): 206-214. (in Chinese) DOI: 10.11804/NuclPhysRev.18.04.206
(沈文庆，詹文龙，叶沿林，等. 原子核物理评论, 2001, 18(4): 206.)

[2] TANIHATA I. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 1996, 22(2): 157. DOI: 10.1088/0954-3899/22/2/004.

[3] BAUMANN T, SPYROU A, THOENNESSEN M. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(3): 036301. DOI: 10.1088/0034-4885/75/3/036301.

[4] NAKAMURA T, KONDO Y. Nucl Instr and Meth B, 2016, 376: 156. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.01.003.

[5] BAUMANN T, BOIKE J, BROWN J, et al. Nucl Instr and Meth A, 2005, 543(2): 517. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.12.020.

[6] GEISSEL H, WEICK H, WINKLER M, et al. Nucl Instr and Meth B, 2003, 204: 71. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01893-1.

[7] KOBAYASHI T, CHIGA N, ISOBE T, et al. Nucl Instr and Meth B, 2013, 317: 294. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.05.089.

[8] YU Yuhong. Development and Construction of Fast Plastic Scintillator Detector Array for External Target Experiment at CSRm[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
(余玉洪. CSRm 外靶实验装置中快塑料闪烁体阵列型探测器研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.)

[9] XIA J, ZHAN W, WEI B, et al. Nucl Instr and Meth A, 2002, 488(1): 11. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00475-8.

[10] SUN Y, SUN Z, YU Y, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 893: 68. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.03.030.

[11] SUN Y, SUN Z, WANG S, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 894: 72. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.03.044.

[12] WANG K, SONG H S, FANG F, et al. Research an anti-coincidence detector unit based on wls fiber and sipm readout[Z]. 2023.

[13] TECHNOLOGY E. General purpose plastic scintillator ej-200, ej-

204, ej-208, ej-212[EB/OL]. 2023. https://eljentechnology.com/images/products/data_sheets/EJ-200_EJ-204_EJ-208_EJ-212.pdf.

[14] PHOTONICS H. Mppcs for precision measurement[EB/OL]. 2022. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf[S13360-6050CS].

[15] TANG S W, YU Y H, ZHOU Y, et al. Chin Phys C, 2016, 40(5): 056001. DOI: 10.1088/1674-1137/40/5/056001.

[16] ZHAO L, KANG L F, ZHOU J W, et al. 核技术: 英文版, 2014(1): 27. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.010401.

[17] CHRISTIANSEN J. Hptdc high performance time to digital converter [EB/OL]. 2004. https://cds.cern.ch/record/1067476/files/cer-002723234.

[18] MANFREDI P, LEONA A, MANDELLI E, et al. Nucl Instr and Meth A, 2000, 439(2): 361. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00852-9.

[19] LIU X, LIU S, AN Q. Nuclear Science and Techniques, 2007, 18(3): 164. DOI: https://doi.org/10.1016/S1001-8042(07)60040-2.

Calibration of the Veto Detector at ETF in HIRFL-CSR

LIU Tuo Qi[1,2], TANG Shuwen[1,2], SUN Yu[3,4], YU Yuhong[1,2], FANG Fang[1,2], WANG Shitao[1,2], ZHANG Xueheng[1,2], SUN Zhiyu[1,2], LU Fenhua[1,2], FU Shengwei[1,2], Li Zhiyao[1,2], WEI Xiaobao[5], XU Yingfeng[1,2]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China Institute of Technology), Ministry of Education, Nanchang 330013, China;
4. School of Nuclear Science and Engineering, East China university of Technology, Nanchang 330013, China;
5. Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Cosmic rays are used for the calibration of the Veto detector at ETF in HIRFL-CSR of the Cooling Storage Ring of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou(HIRFL-CSR). The work is divided into two parts: position calibration and time calibration. The hit positions of particles are obtained by position calibration and an uniform standard of the measurement of particle hit time in the Veto detector is built through time calibration. The information of position and time of particles serves as important criteria for eliminating changed particle events that hit the neutron wall detector, providing support for the realization of the physical objectives of the neutron wall detector. A 2.53 cm position resolution and a 1.09 ns time resolution have been achieved in this paper.

Key words: Veto detector; calibration; cosmic ray; position resolution; time resolution

Received date: 05 Feb. 2024; **Revised date:** 05 Feb. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.U2031206, No.12273086, No.U1832122); Open Fund of East China University of Technology Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (HJSJYB2022-3)

Corresponding author: TANG Shuwen, E-mail: tangsw@impcas.ac.cn